

振動試験による精密機器の故障解析

— ランダム振動試験に関する研究 —

岩間貴司・大柴勝彦・藤原和徳・佐野正明

Study on Failure Analysis of Precision Instrument using Vibration test system (2nd report) — Study on Random Vibration Test —

Takashi IWAMA, Katuhiko OSHIBA
Kazunori FUJIHARA and Masaaki SANO

要 約

県内主要幹線道路を小型貨物自動車で行走試験し、これらの走行データを解析し、製品が輸送時に受ける振動ストレスの再現を目的として、各種ランダム波による再現試験を実施したところ次のことが分かった。

- (1) 高速走行 (70~90km/hr) 時に、後部荷物室での垂直方向にかかる振動エネルギーを解析した結果、100Hz付近にパワースペクトラム密度 (PSD) のピークがあり、時刻歴波形の自己相関関数から正弦波成分である事を確認した。
- (2) 上記解析結果から、MIL-STD-810D(E) で提唱されるテーラリング思想に沿った各種ランダム振動試験を実施したところ、ランダム オン ランダム波 (ROR)、サイン オン ランダム波 (SOR) による振動試験が有効であることを確認した。

1. はじめに

MIL-STD-810D(E) に示されるテーラリング思想は、製品が市場環境で受ける振動状態を測定・解析し、最適な試験条件の設定を行うことが提唱¹⁾²⁾され、軽薄短小化、多機能化が著しく進む製品に対して、画一的な試験を行う事により過剰な高剛性化、包装対策が製品のコストアップの大きな要因になる不合理性が指摘されている。

この視点で、振動試験方法を考えた場合、従来の正弦波を主体にした規格が実走行データ等の振動環境に近似したランダム振動におき変わっていく事は必至である³⁾。また、当センターに依頼される振動試験においても最適な振動試験条件 (加振波形、加振レベル) の決定に苦しむ企業が多い。

そこで、今回は小型精密機器の運搬に広く使用される小型貨物自動車を対象車種とし走行試験を実施し、走行データの分析および各種再現試験を行った。

2. 試験方法

2-1 走行試験

表1に、走行条件の概略を示す。試験には、小型貨物自動車 (前輪駆動、1600CC) を使用し、高速道路 (KOUSOKU)、国道20号 (R20)、国道52号 (R52) を走行し、走行時の荷物室の振動状態を測定した。図1に加速度センサーの取付状態を示す。3軸加速度センサー (EMIC製 710-A3) は後部荷物室右側 (車軸後方) にマグネット治具を作成し固定した。

荷物室の振動状態はデータレコーダに記録し、PSD解析は、FFTアナライザー (エーアンドデー製AD3525、EMIC製DCS7800) で行った。

表1 試験車両の走行条件

道路	路面	速度	区間
高速道路	中央自動車道	70~90km/hr	小淵沢~ 上野原
一般道路	国道 20 号	0~60km/hr	白州~ 甲府
一般道路	国道 52 号	0~60km/hr	甲府~ 身延

表2 加振時の各軸のオーバーオールレベル

加振状態	Z 軸	Y 軸	X 軸
加振時	0.77	0.07	0.06
非加振時	0.04	0.05	0.05

単位: Grms (m/s^2 rms)

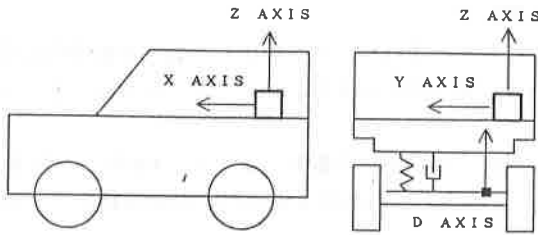


図1 走行試験モデル図

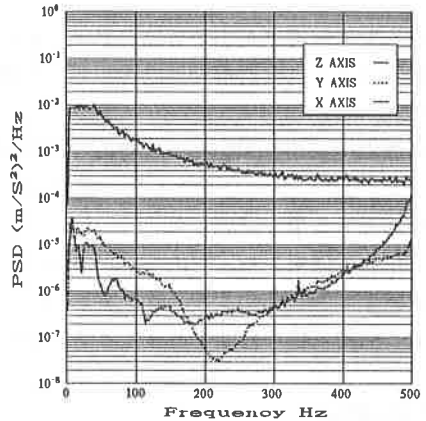


図2 3軸加速センサの分離特性

2-2 加速度センサ校正

図2に3軸加速度センサの分離特性(垂直水平感度比)¹⁾を示す。加振波形はMIL-STD-810D common carrier vibration 上下方向¹⁾を基準とした。

3軸加速度センサを使用する場合、測定方向に対し加速度の方向が水平である場合は、直角方向の他の2軸の出力は一種のノイズとなるためその影響度を調べた。表2は、振動試験機(EMIC製VC-10DAMX(32)-1000BD/A-E78)を使用して加振したときの、各軸のオーバーオールレベル(O. A. レベル)で、図2は使用周波数範囲内の各軸のPSDである。

表2の結果から加振時のX軸、Y軸の出力は非加振時とほとんど変化なく、図2に示されるように、広い周波数範囲で20dB以上の比を持っていることが確認できる。したがって今回の走行試験に十分使用できることがわかる。

3. 実験結果及び考察

3-1 走行条件と3方向の加速度軸

図3に走行条件の違いによる各軸のO. A. レベルを示す。各レベルは、高速道路は30秒間の平均値を全走行時間で平均したものであり、一般道路は1分間の平均値である。これらの結果より、高速道走行時は、一般道走行に比較してO. A. レベルが高く、特に左右方向を示すY軸のレベルが他軸に比べ高いこともわかる。図5に各道路を走行時のO. A. レベルを示す。高速道走行時は、連続走行であるため一定レベルを示している。

一方、一般道走行は、信号待ち、渋滞、路面状態の急激な変化等によりレベルが大きく変動している事が確認できる。

3-2 走行データ解析例

振動のエネルギーは、振幅（加速度）の2乗に比例することから、PSDを単位として振動を記述するケースが多く、解析結果から特定の周波数帯にどの程度のエネルギーがあるか確認できる。

図5に高速道走行時（走行開始15分後）の各軸毎のPSDを示す。X軸、Y軸は周波数軸に対するエネルギーの分布状態が近似しており、Z軸と比較して50Hz以下の周波数帯で特に異なる特性を示している。また、各軸とも100Hz付近にピークが存在していることが確認できる。

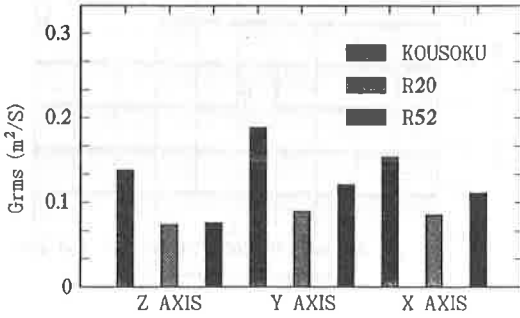


図3 走行条件とO. A. レベル

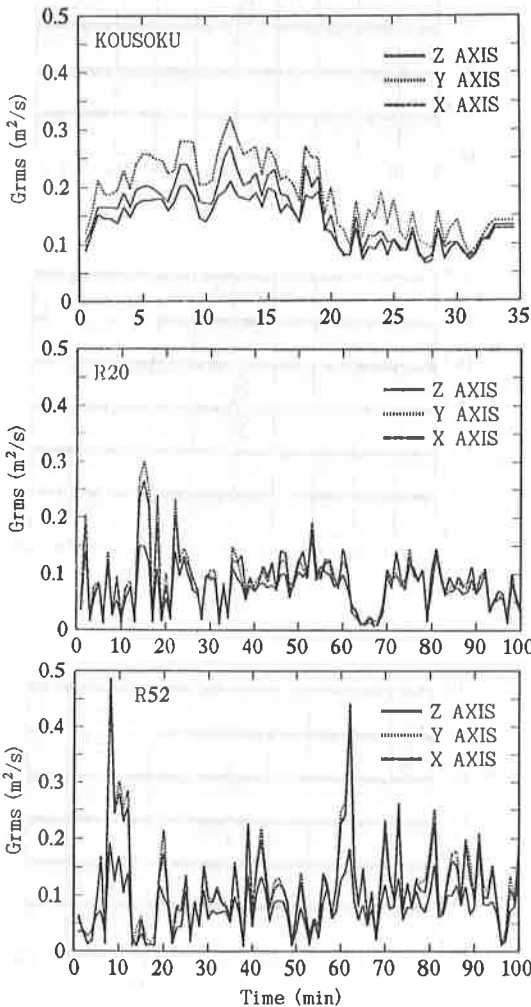


図4 走行道路とPSD

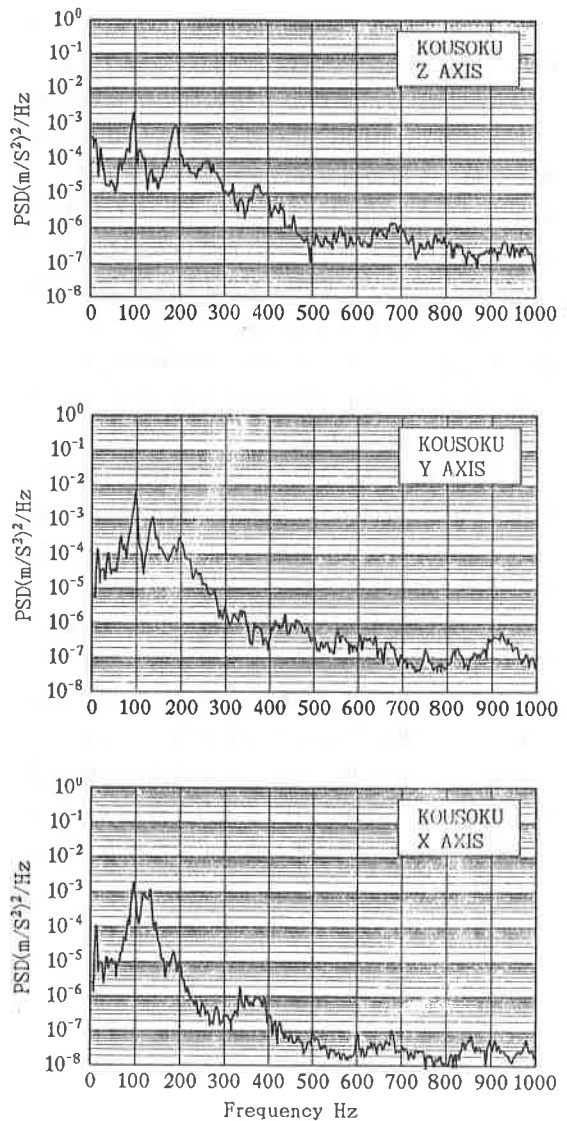


図5 PSD解析例（高速道走行時）

3-3 走行条件と卓越周波数

PSDにおいて振動エネルギーの最大値を与える周波数を卓越周波数⁶⁾とし、走行状態(道路, 測定方向)毎の卓越周波数とPSD値を図6に示す。

図6より一般道走行においては、Z軸の卓越周波数は20Hz以下、30Hz付近及び80Hz~150Hzの3種類に分かれ、Y軸、X軸についても、90Hz付近を中心に、30Hz付近及び140Hz付近にピーク値が集中している。

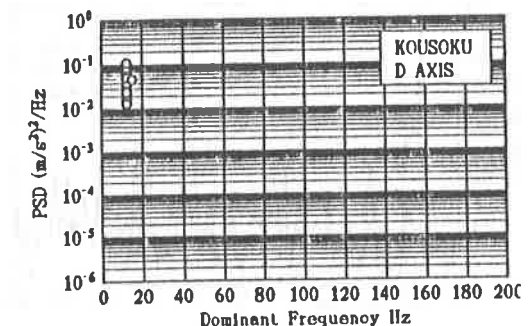
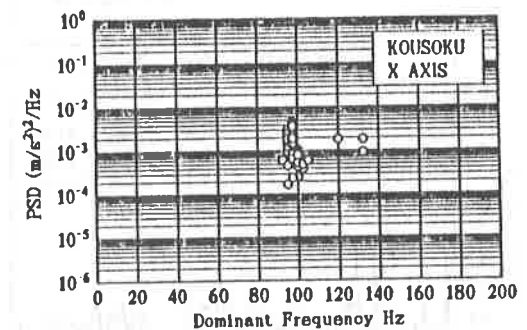
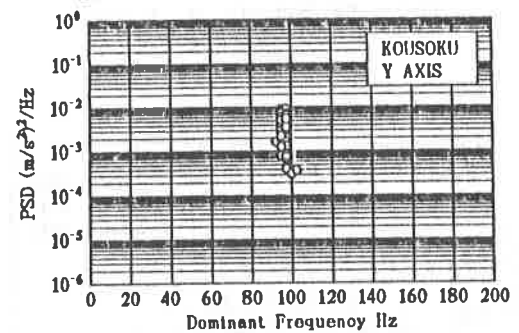
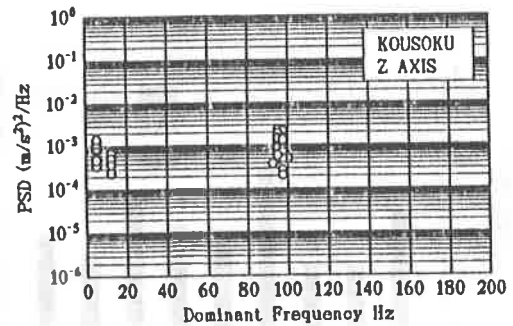
一方、高速道走行時は、各軸ともほぼ90~100Hzに卓越周波数が集中していることが確認できる。

一方、トラック(2.5t積み平ボデー車)の走行時の荷台におけるPSD測定結果例⁶⁾によると、垂直軸方向のPSDのピークは3つ存在し、第1のピークは0~5Hzで、車両の支持装置の固有振動数によるもので、中間のピークは、10~20Hzで車軸、車輪、支持装置で構成されるバネ下質量に、第3のピークは50~100Hzでタイヤの固有振動数にそれぞれ起因すると述べられている。そこで、今回の走行データとトラックの走行データを比較してみると、高速道走行(KOUSOKU)時のZ軸(垂直方向)のデータはデータが極めて近いことがわかり、高速走行時のZ軸方向のPSDデータは、異なる車両にも相関があることがわかった。

また、D軸(バネ下)の卓越周波数は、図より約16~18Hz付近にあり、これは試験車両が100km/hrで走行したときの後輪の(直径約50cm)回転数にほぼ一致していることも確認できる。

次に、高速道走行時の顕著な90~100Hz付近のピーク値に関してどのような波形が最も影響を与えているか、Z軸及びD軸の加速度の時刻歴波形に対して自己相関を求めた結果を図7に示す。

結果より、正弦波に近似される周期的な振動波形が観測され、高速走行時の荷台垂直方向の加速度波形は正弦波にランダム波が乗った状態であることがわかった。



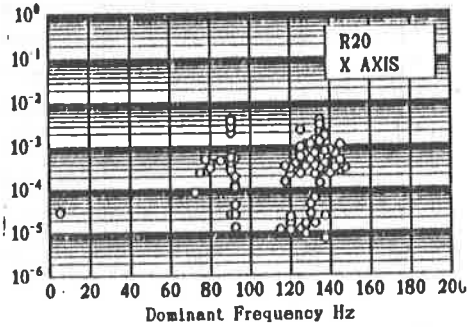
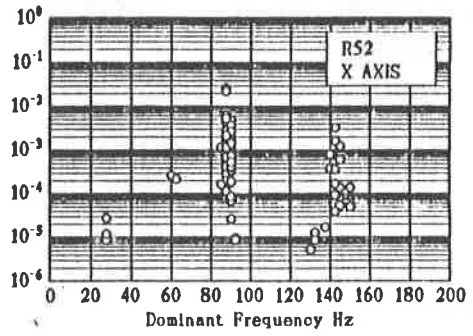
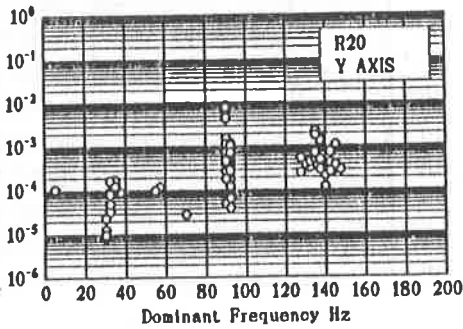
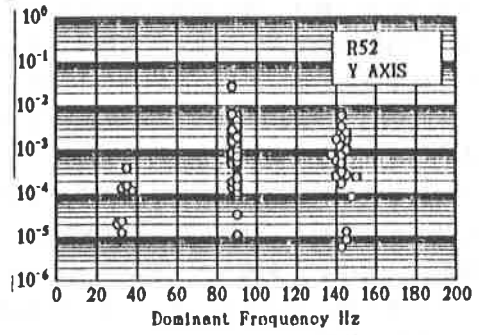
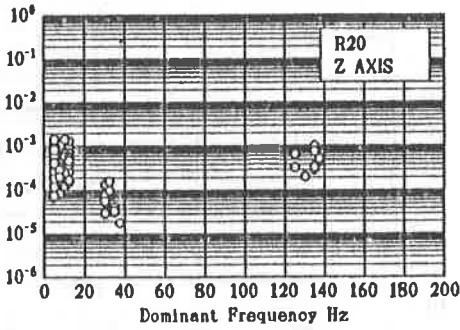


図6 走行状態（道路，測定軸）と卓越周波数

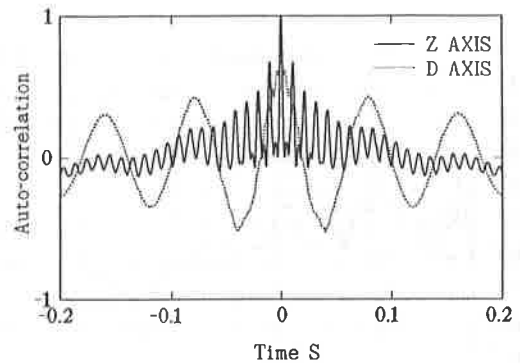
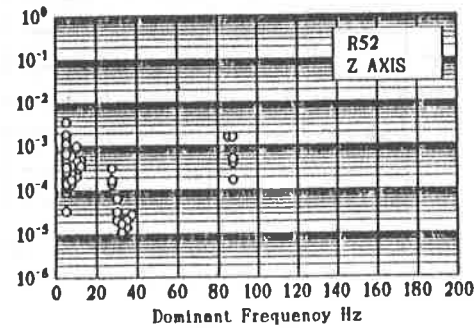


図7 高速道走行時のZ軸，D軸の時刻歴波形の自己相関関数

3-4 再現試験について

県内企業が製品輸送に最も頻繁に利用する輸送経路は中央自動車道であり、また、考察3-3の結果から他車両と近似していた測定軸が垂直軸方向（Z AXIS）であることから、高速走行時のZ軸方向を再現試験の対象とした。

図8に試験装置及び図9に各種ランダム波で加振した時のテーブル上で計測したPSD曲線を示す。加振波形は、走行データ波（データレコーダで再現）、ランダム波、ランダム オン ランダム波（ROR）及び2種類のサイン オン ランダム波（SOR）である。これらのランダム波を比較するためにPSD曲線からO. A. レベルを求めGrms値を一致させた。

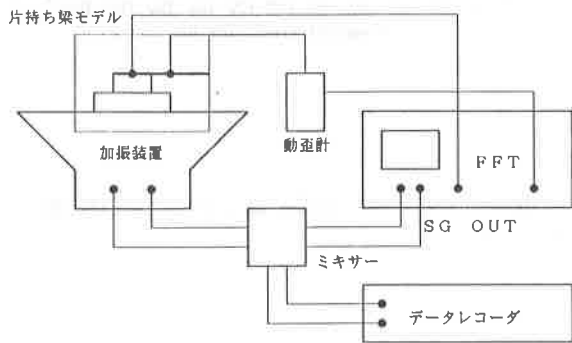


図8 加振装置

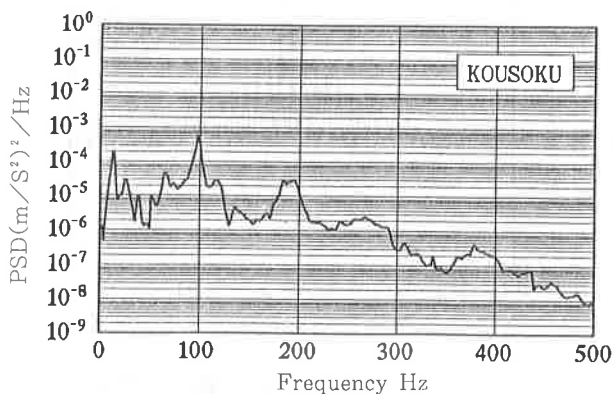
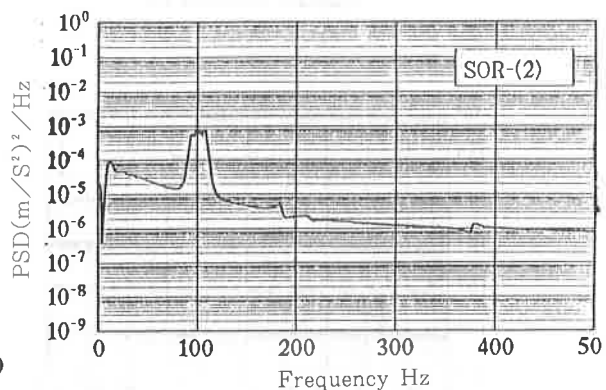
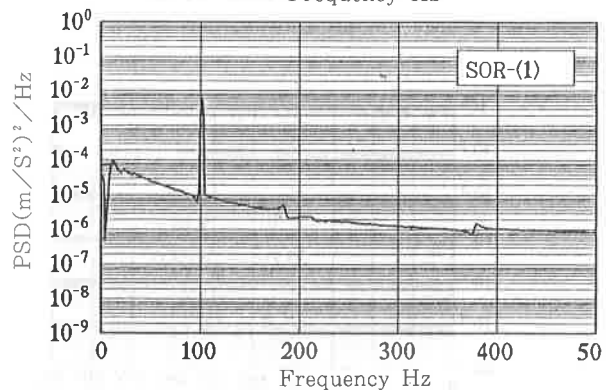
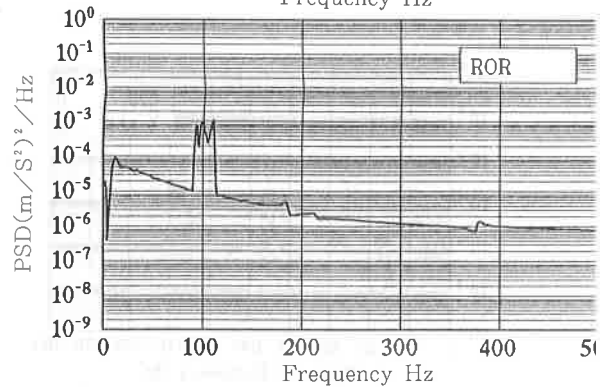
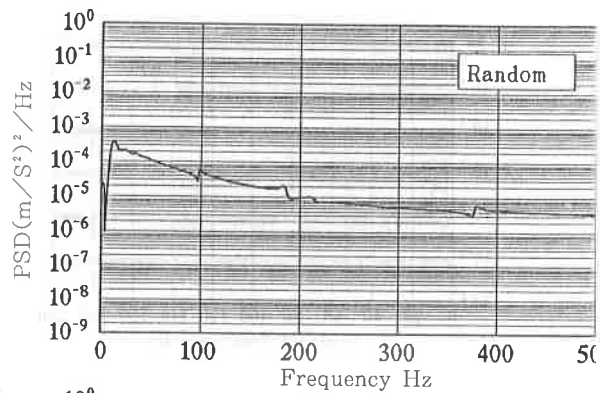


図9 計測PSD

3-5 ランダム波の比較

図9において、高速道走行データ (KOUSOKU) の特徴は100Hz付近のPSD値のピークであり、解析結果より正弦波で近似される波形のエネルギーの影響と考えられる。ROR, SOR-(1), (2)による再現試験には、この特徴を生かした。特にSOR-(2)は、ランダム波に乗せたサイン波を掃引(90~110Hz)させているため、最も実走行に近い再現波形と考えられる。

次に、実際の振動試験にこれらランダム波, ROR, SORを有効に適用していくために、図10に示す、片持ち梁モデル(共振周波数約100Hz)を輸送対象物と仮定し、梁支持付近に取り付けた歪ゲージ及び動歪計を検出器とし、加振試験時の梁の振動ストレスを梁に取り付けた歪ゲージの伸縮により推定した。

動歪計の電圧出力の振幅の頻度分布を比較することにより各波の比較を行った結果が図11で、梁が大きな振幅(変位)で振動するときは出力電圧の振幅(電圧)も大きくなり、振動しない時は出力電圧は0Vである。表3に試験時の環境及び動歪計の仕様を示す。

表3 試験環境および試験機仕様

項目	仕様
室温	21~23℃
歪ゲージ	STEEL, 5mm, 119.8±0.2Ω
動歪計	応答周波数特性 DC~2.5kHz
	非直線性 ±0.1%FS

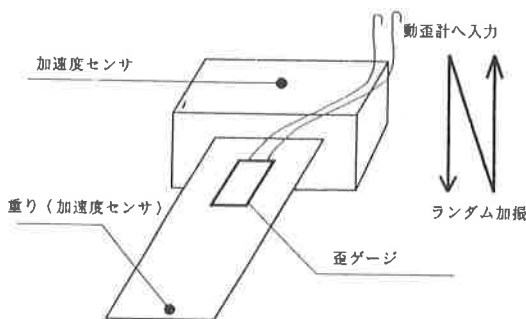


図10 片持ち梁モデル

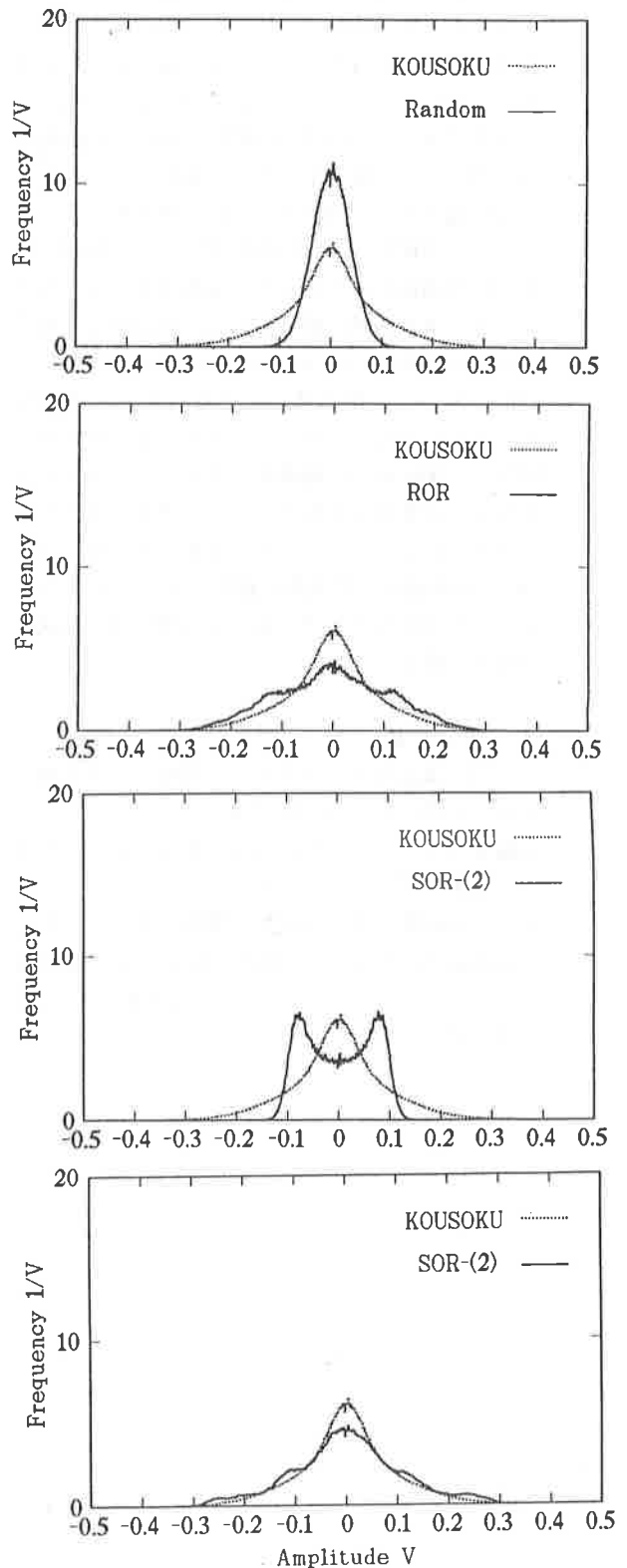


図11 動歪計の出力電圧の頻度分布

3-6 図11の結果より、各波形を比較するとランダム波と比較してROR, SOR-(2)波による再現試験が実走行データによる振幅(電圧)分布に近い事がわかる。しかし、SOR-(1)については、片持ち梁モデルの共振周波数とSORの正弦波成分(100HZ)は近すぎるため、実走行データと異なる振幅(電圧)分布をしている事がわかる。

これらの結果から、片持ち梁モデルの振幅(電圧)の分布幅が大きいくほど、振動ストレスは大きく、ランダム振動試験において、供試体に共振系が存在する場合は、同レベルのGrms値をもつPSDであっても供試体が受けるストレスは異なることがわかる。つまり、ランダム波は供試体に間欠的(加振波形の頻度から考えて)にストレスを与え、正弦波は連続的にストレスを与えていると考えられる。今回の片持ち梁モデルに関してROR, SOR波は、供試体に適度なストレスを与えることが可能なランダム波である事が以上の試験結果から確認できた。

4. まとめ

今回、実走行データをもとに各種ランダム波により、室内試験を行い供試体がフィールドで受ける振動ストレスをいかに再現できるか試みた結果以下の事が明らかになった。

(1) 走行状態と卓越周波数の関係を調べた結果、高速道走行時の垂直方向の振動状態は他車両(2.5tトラック)のPSDデータと近似している事が確認できた。

(2) 高速道走行時のPSDデータの100Hz付近のピーク値は、時刻歴波形の自己相関関数により正弦波に近似される周期的波形の影響によるものである事が確認できた。

(3) 片持ち梁モデルに対して実施した各種ランダム振動試験の結果より、SOR-(2)サイン オン ランダム波が実走行に近い振動ストレスを供試体に与える事がわかった。

今後、これらの手法を参考に今後県内企業においても増加していくランダム振動試験に有効に実施するために、今後さらに多車種、多製品について測定・解析を行っていく。

参考文献

- 1) 関西電子工業振興センター規格情報分科会81
OWG訳: MIL-STD-810D環境試験方法—工学的ガイドライン 日本規格協会
- 2) IMV(株): ランダム振動セミナー PART
- 3) 月居和英 他: “トラック輸送時の振動再現試験について” 包装研究 Vol. 5, No. 2 (1985)
- 4) 中部エレクトロニクス振興会: “実装印刷配線板信頼性に関する研究(第四報) —振動に関する研究— P3~P4 (1992)
- 5) 時田保夫, 森村正直: 防振制御ハンドブック P12
- 6) 木村年治 他: 精密機器・電子機器包装ハンドブック P18 (1991)